

文章编号 :1007 1385(2006) 05 0001 05

飞机骨架结构方案的优化设计

邓扬晨¹ 秦政琪²

(1. 沈阳飞机设计研究所,辽宁 沈阳 110034 2. 沈阳航空工业学院,辽宁 沈阳 110034)

摘 要 :为了能够有效地降低飞机结构承力件的重量 ,针对飞机骨架 ,以加强框和普通框以及翼梁的概念设计为研究内容 ,通过对“ 敏度阈值 ”概念的分析 ,指出其不足 ,提出了“ 改进的敏度阈值 ”概念 ,并与“ 约束补偿 ”策略结合而形成新的拓扑优化算法 ,用于上述结构件的材料布局优化设计。多个算例中的拓扑优化结果均显示其结构型式十分新颖 ,值得深入地探讨。由此可以得出 3 点结论 (1)采用 CAD/CAE 和拓扑优化相结合用于飞机结构件的初始方案设计是可行的 ; (2)作者提出的“改进的敏度阈值”拓扑优化算法是有效的 (3)构建一种具有良好操作性的、有别于经验设计的飞机结构件概念设计新方法。

关键词 :飞机结构件 ;概念设计 ;拓扑优化 ;敏度阈值 ;约束补偿 ;CAD/CAE ;集成设计

中图分类号 :V222

文献标识码 :A

在工程等领域 ,无论航空、航天、航海还是车辆工程 ,均存在大量的结构布局设计问题 ,大到航天飞机 ,小到一个机械零件 ,都存在结构拓扑优化问题。拓扑优化技术是开展结构轻量化设计研究十分有效的手段之一 ,尽管这方面成功的工程应用与形状、尺寸优化工作相比少了许多。

一般地 ,任何一架飞机都缺少不了主承力骨架 ,具体为机身的框结构件与上下大梁 ,机翼的翼梁与翼肋等^[1]。它们轻量化设计水平的高低同样能够一定程度地反映出飞机结构设计水平 ,因此 ,开展飞机承力构件轻量化设计方法研究 ,毫无疑问 ,能够为飞机结构设计做技术上的储备与积累。在这方面 ,美国与欧洲一些国家的研究工作做得比较好。

本文将围绕飞机结构件的初始方案设计开展研究工作 ,这里以拓扑优化为技术手段。

1 基本方法

对于飞机受力结构件来讲 ,无论是机身加强框、普通框还是翼面的大梁 ,它们的最优结构型式是飞机结构设计师首先关心的问题 ,通常是采用设计经验和直觉判断来解决这一问题的。本文采用集成的思想来解决上述问题 ,运用 CAD、CAE 和拓扑优化 法相结合的技术途径来体现上述设计理念。作者从工程实用角度出发 ,针对飞机结构

传力的特点 ,认为使用结构拓扑优化技术部分代替设计人员的工程经验与直觉判断 ,从方法上可看作是从“ 感性 ”到“ 理性 ”的一种质的飞跃。

飞机的框和翼梁属于比较典型的航空薄壁平面结构 ,其法向刚度要比面内刚度小得多。加强框为翼面结构提供弹性支撑 ;普通框为机身蒙皮提供弹性支撑 ,用以防止蒙皮失稳 ;翼梁承担翼面的弯矩。因此 ,无论是机身框还是翼梁 ,它们的刚度特性都是比较突出的问题。由此可提出这样的结构拓扑优化模型 :在一定的材料用量的条件下 ,寻找具有某种度量的最大刚度(此处指结构的最小柔顺性)的飞机结构件材料最佳分布形式。此项工作的完成对上述结构件的详细设计会具有很好的指导性。

这里给出如下优化模型 :

$$\text{最小化 } \alpha(\vec{X}) = \vec{F}^T \cdot \vec{U}(\vec{X})$$

$$\text{满足 } \begin{cases} \mathcal{A}(\vec{X})/S_0 \leq f \\ 0 < x_i \leq 1 \quad i = 1, \dots, N \end{cases}$$

其中 \vec{X} 为设计变量(这里为伪密度)向量 , $\alpha(\vec{X})$ 为结构的柔顺性 , \vec{F} 为节点载荷向量 , $\vec{U}(\vec{X})$ 为节点位移向量 , $\mathcal{A}(\vec{X})$ 为在设计变量状态下的结构件有效面积 , S_0 为在设计变量取 1 状态下的结构件有效面积 , f 为材料用量的百分比 , N 为设计变量的 目。

整个设计过程的流程框图见图 1。

1.1 几何造型平台

针对本项研究工作,利用 UG 或者 CATIA 软件所形成的 CAD 几何造型平台进行飞机结构件的平面几何建模,是一件省时与省力的工作。这里采用 CATIA 软件完成上述的几何造型工作,并以 PARASOLID 数据格式传递信息。

1.2 有限元建模平台

利用 CAE 平台中的前置处理器、结构分析器和后置处理器进行飞机结构件的有限元建模和求解。这里采用 ANSYS 软件完成上述任务。

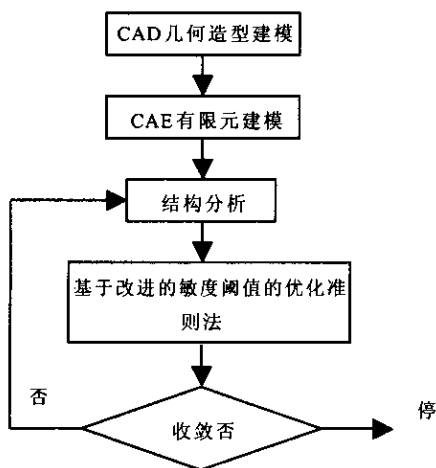


图 1 飞机结构件概念设计流程框图

1.3 拓扑优化准则法

利用“灵敏度阈值”和“约束补偿”策略用于飞机翼面结构的拓扑优化,取得了一定的效果^[3]。对上述做法进一步研究发现:(1)材料用量在 40% ~ 60% 时,无论是拓扑优化的最优图形还是伪密度的最优结果数值,都是很理想的。(2)材料用量小于 40% 时,拓扑优化的最优图形很好,可是,伪密度的最优结果数值应该接近 1 的却普遍偏低。(3)材料用量大于 60% 时,拓扑优化的最优图形很好,可是,伪密度的最优结果数值应该接近 0 的却普遍偏高。后两者情况反映在目标函数上则是结构柔顺性偏大,究其原因,作者认为由于“阈值”取了归一化“灵敏度”向量里的中间值,其数值一般为 0.4 ~ 0.6,这也正是第一种情况结果理想的原因。由此看来,“阈值”的确定应该与“材料用量多少”存在一定的联系。经上述的分析,本文提出“改进的灵敏度阈值”概念,也就是将“原来的阈值”乘以材料用量比例,再除以系数 0.4 ~ 0.6 所得到的值作为“新的阈值”。从新定义的

“阈值”可知:当材料用量为 40% ~ 60% 时,它变为“原来的阈值”。同时,“约束补偿”措施仍然采用前述的做法。这里给出改进的优化算法步骤:

(1) 灵敏度向量的归一化

$$\vec{H}(\vec{X}^{(k)}) = \frac{-\nabla \alpha(\vec{X}^{(k)})}{\max(-\nabla \alpha(\vec{X}^{(k)}))}$$

(2) 灵敏度向量的“阈值”

$$\alpha(\vec{X}^{(k)}) = \text{median}[\vec{H}(\vec{X}^{(k)})] \times \frac{f}{0.4 \sim 0.6}$$

(3) 寻优方向

$$\vec{S}(\vec{X}^{(k)}) = \text{sign}\{\vec{H}(\vec{X}^{(k)}) - t \vec{X}^{(k)}\} \cdot \vec{e}$$

(4) 设计变量的改变量

$$\Delta \vec{X}^{(k)} = \text{move}(\alpha(\vec{X}^{(k)})) \cdot \vec{S}(\vec{X}^{(k)})$$

(5) 设计变量的过渡量

$$\vec{X}^{(k+1)} = \vec{X}^{(k)} + \Delta \vec{X}^{(k)}$$

(6) 设计变量的迭代式

$$\vec{X}^{(k+1)} = \min\{\max[\vec{X}_{\min}^{(k+1)}, \vec{X}_{\max}^{(k+1)}], \vec{X}^{(k+1)}\}$$

其中,算子 $\min(\cdot)$ 表示对某一向量中的所有元素取其最大值,为一标量;算子 $\text{median}[\cdot]$ 表示对某一向量中的所有元素取中间值,也为一个标量;算子 $\text{sign}\{\cdot\}$ 为符号函数,为一向量;它们均是 MATLAB6.5 环境中的内部函数。 $\vec{e} = (1, \dots, 1)^T$; $\text{move}(\vec{X}^{(k)})$ 表示优化过程中的运动限(move-limit),为一标量,这里采用一种自适应的运动限; $\vec{X}_{\min}^{(k+1)}$ 与 $\vec{X}_{\max}^{(k+1)}$ 分别表示迭代第 $(k+1)$ 次的设计变量下界和上界。本算法的数值迭代过程及结果表明 $\vec{X}_{\min}^{(k+1)}$ 与 $\vec{X}_{\max}^{(k+1)}$ 可以直接取为 \vec{X}_{\min} 与 \vec{X}_{\max} ,即设计变量的下界与上界,这里分别取 0.01 和 1。

2 算例

为考核和检验本文思路是否有效,以框结构的方案设计为例。其中,框又分为加强框^[4]与普通框^[5],而加强框则分为独立框、框梁组合件,进一步,加强框又分为有单发动机与双发动机通过的框。加强框的载荷主要分为二种工况:(1)弯剪组合;(2)纯剪切。普通框的载荷为周缘分布形式。

对于虚拟的模拟加强框来说,单发动机框的边界条件与载荷简化情况见图 2;双发动机框的边界条件与载荷简化情况见图 3;框梁组合件所采用的简化方法类似,这里从略;普通框的边界条

件与载荷简化情况见图 4。

单发动机加强框的拓扑优化结果的型式见图 5 双发动机加强框的拓扑优化结果的型式见图

6 模拟带内埋弹舱的飞机加强框的拓扑优化结果型式见图 7 3 种载荷工况的归一化的结构柔顺性迭代历程见图 8。

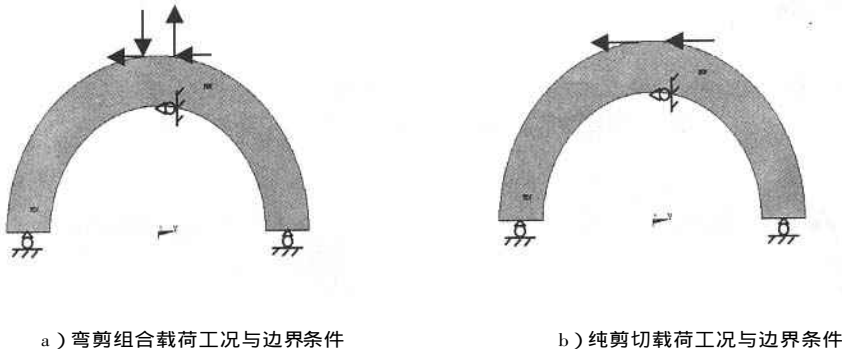


图 2 单发动机框的简化形式(取对称结构的一半,旋转 90°)

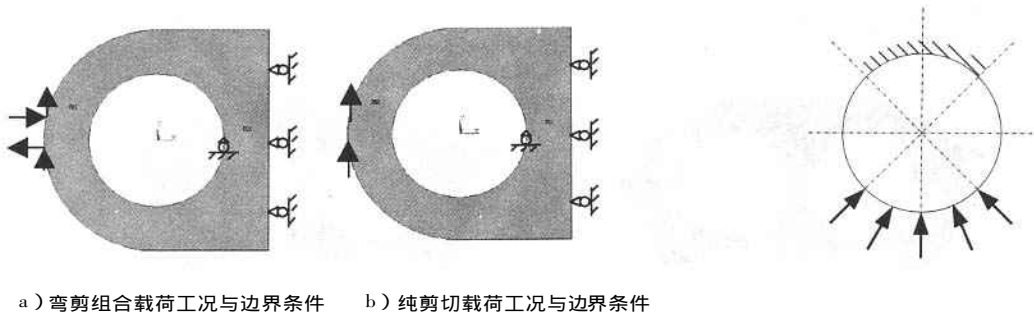


图 3 双发动机框的简化形式(取对称结构的一半)

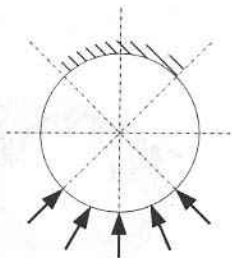


图 4 普通框的简化模型

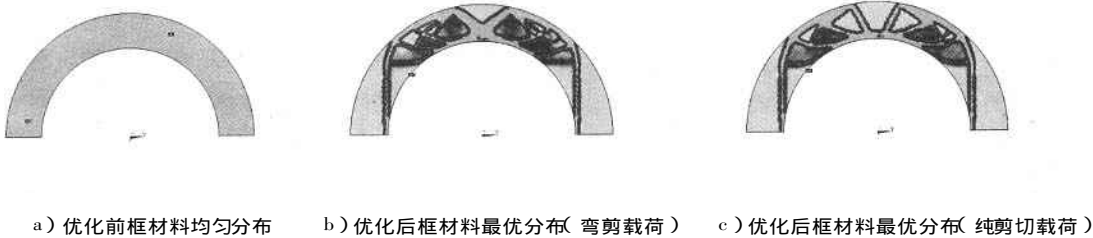


图 5 单发动机加强框的拓扑优化结果(取结构的一半)

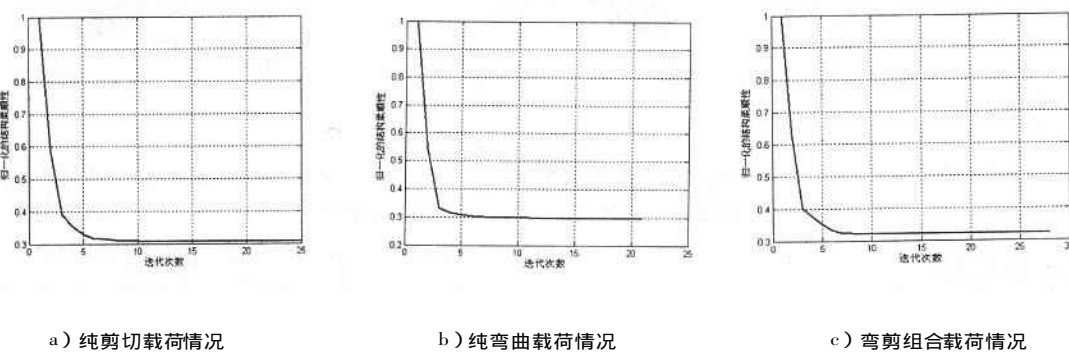
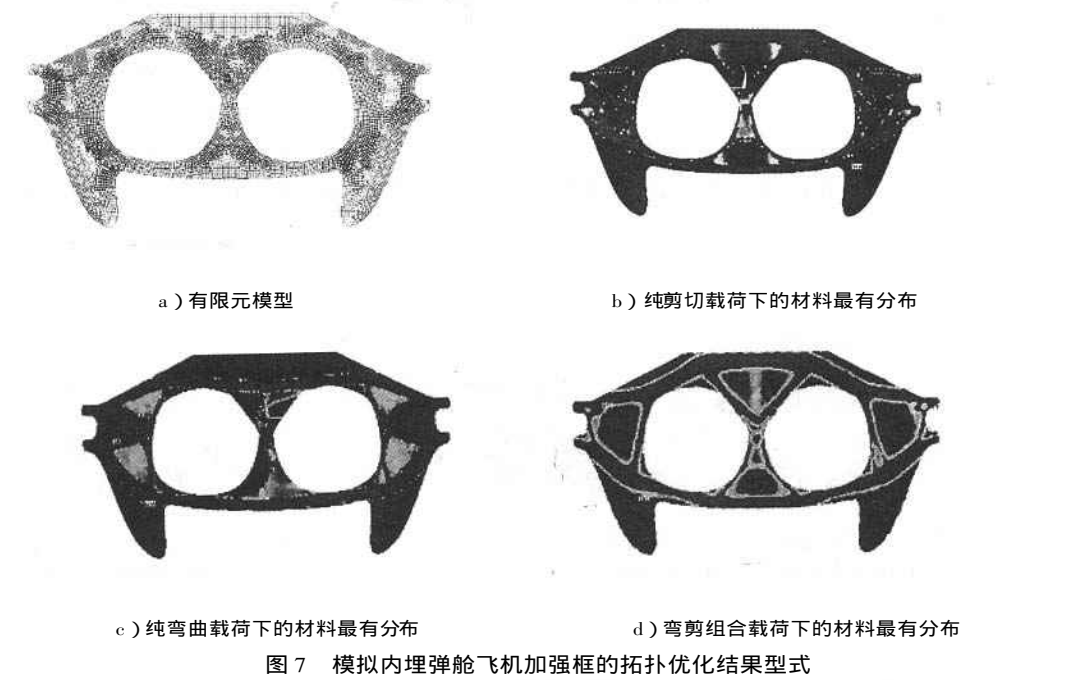
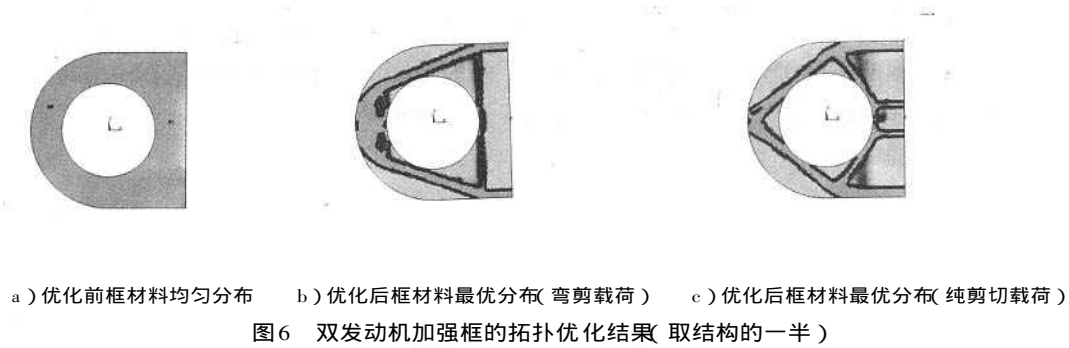
3 讨论与结论

从图 2~图 4 可以看到:本文所建立的框模型是按照工程实际中飞机框结构的几种受力状态进行简化的,严格遵循结构设计专业的背景知识;从图 5~图 7、图 8 可以看到:所优化的材料分布结果作为结构件来说,其结构形式十分新颖,在目前国内、外的飞机上,无论是有人飞机还是无人飞机,都不曾见到,按照最小柔顺性的要求,经过分析,作者认为这些结构型式有其合理性,这对进一步详细设计能够提供一定的指导性。从图 8 容易得出,除了迭代次数存在不同外,结构件的柔顺性

均随迭代次数的增加而平稳地减小,最后收敛到工程可接受的优化解,结合数值优化的过程来看,本文提出的算法具有很好的计算稳定性和收敛性。从而可以说明:本文算法计算稳定、有效,能够满足工程上概念设计的需要。

最后,通过本文的研究工作,可以得出如下结论:

- (1)采用 CAD 和 CAE 以及结构拓扑优化手段三者集成的技术途径,用于飞机结构件的概念设计,获得了成功。
- (2)利用作者提出的改进的“敏度阈值法”作为本文的优化器,算例结果表明了该算法稳定并且有效。



(3)构建了一种具有可操作性的、有别于经验设计的飞机结构件初始方案设计新方法。

参考文献：

[1] 邓扬晨,张卫红,朱继宏,等. 从机翼薄壁盒结构设计引出的问题[J]. 力学与实践 2004(6) 20 - 22

[2] Lars Krog. Application of topology , sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components[M]. Alastair

Tucker and Gerrit Rollema Airbus UK Ltd , Advanced Numerical Simulations Department , Bristol , BS 99 7AR.

[3] 邓扬晨,张卫红,万敏,等. 飞机活动翼面的结构布局方法研究[J]. 力学与实践 2004(5) 14 - 17

[4] 邓扬晨,陈华,马明亮,等. 基于拓扑优化技术的飞机普通框设计方法研究[J]. 强度与环境 2005(2)

[5] 邓扬晨,李学军,朱继宏,等. 基于敏感度阈值拓扑优化 法在飞机加强框设计中的应用[J]. 力学与实践 2005(4) 26 - 31

Optimal design of airframe on aircraft structure

DENG Yang chen¹ QIN Zheng qi²

(1. Shenyang Aircraft Design & Research Institute , Liaoning Shenyang 110035 2. Shenyang Institute of Aeronautical Engineering , Liaoning Shenyang 110031)

Abstract In order to decrease the weight of aircraft structural part effectively ,face to the skeleton of aircraft , the author regards the conceptual design of structural part (such as strengthen frame , general frame and canard beam) as research content. By analyzing the concept of 'gradient threshold' and pointing out its weakness , the author proposes the concept of 'modified gradient threshold' and combines it with the strategy of 'constraint compensation' to form a new kind of topology optimization algorithm for structural layout of structural parts. The topology optimization results of multiple examples show that their layouts are very innovative and are deserved to be studied in detail. So we can draw three conclusions. One is that using the combination of CAD/CAE and topology optimization for aircraft structural part above mentioned conceptual design is feasible. The other is that the proposed 'modified gradient threshold' topology optimization algorithm is effective. The last is that a new design approach with good operation which differs from conventional design method is constructed for structural part structure layout.

Keywords : aircraft structural part ; conceptual design ; topology optimization ; gradient variable - threshold ; constraint compensation ; CAD/CAE ; integrated design

(上接第 67 页) 会信息化水平的不断提高 , 网上教学及测试过程也得到广泛的应用 , 开发网上考试系统为学生个性化学习提供灵活、方便、科学的学习服务手段已成必然。本系统是我校教改立项课题 , 其目标是建一个高效、可靠的运行于 WEB 模式下的考试系统。在实际使用和推广前 , 尚需进行大量反复测试 , 不断完善 , 才能将该系统投入到实际教学应用中。当然 , 要完成一个更加完善、高效、可靠的考试系统 , 仍有许多工作要做 , 如客户端控制机制、根据成绩分析结果动态调整组卷

策略等。

参考文献 :

- [1] 汪强兵 , 刘广钟. 基于 J2EE 的 Web 企业计算[J]. 计算机工程 , 2002 28(1) 261 - 263
- [2] 萨师煊 , 王珊. 数据库概论(第三版) [M] 北京 : 高等教育出版社 , 2000. 363 - 389
- [3] 郑人杰. 软件工程高级培训教程[M]. 北京 : 清华大学出版社 , 2000. 12 - 25
- [4] Danny Ayers 著 , 曾国平 , 冯伟 , 王占峰 , 等译. JAVA 服务器高级编程[M]. 北京 : 机械工业出版社 , 2001

Development of the online examination system base on B/S mode

QIU Hong kun LIU Cheng WANG Ya jie

(The Center of Engineering Training SYIAE , Liaoning Shenyang 110034)

Abstracts : This paper introduced the present situation and trend of the tradition examination firstly. According to the needs of users currently , it put forward a new examination system base on B/S(Browser/Server) mode secondly. The paper introduced some related techniques and analyzed its feasibility , reliability , efficiency , and so on. Then it gave a system solution in the meantime. Finally , the paper elaborated the whole system's security and some points that need improving.

Keywords : exam ; J2EE ; JSP ; Browser/Server